

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

VITO JAKULICA

ALTERNATIVNE TEHNOLOGIJE PORIVA
BRODOVA

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2018.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA

**ALTERNATIVNE TEHNOLOGIJE PORIVA
BRODOVA**

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

dr. sc. Đorđe Dobrota

STUDENT:

Vito Jakulica

(MB:0055394585)

SPLIT, 2018.

SAŽETAK

Većina današnjih brodova kao primarne pokretače propulzora, najčešće brodskog vijka, koristi dizelske motore. Razlog je njihova toplinska učinkovitost, konceptualna jednostavnost i veća pouzdanost. Međutim, negativni utjecaj na okoliš s posljedično sve strožom legislativom za njegovu zaštitu te rastuće cijene goriva i uvođenje poreza na emisije štetnih plinova čine upitnim korištenje postojećih tehnologija te stvaraju potrebu za traženjem novih, optimalnijih rješenja poriva broda. Cilj rada jest dati pregled mogućih alternativnih tehnologije poriva broda, opisati njihove glavne značajke te navesti prednosti i nedostatke njihovog korištenja u pogledu ekonomske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti.

Ključne riječi: *porivni sustav, zaštita okoliša, obnovljivi i neobnovljivi izvori energije.*

ABSTRACT

Most of today's ships as a primary propulsion system, most commonly propeller, use diesel engines. Reason for that is its thermal efficiency, conceptual simplicity and higher reliability. However, certain negative environmental impacts resulting in greater environmental regulation for its protection, rising fuel prices and the introduction of tax on emissions of pollutants make the questionable use of existing technologies and create the need for seeking new, more optimal solutions for propulsion system. The aim of the paper is to determine the main alternative propulsion system technologies, describe their main properties, advantages and disadvantages in order to find the most economic and ecologic alternative.

Key words: *propulsion system, environmental protection, renewable and non-renewable energy sources.*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PORIVNI SUSTAV BRODA	3
2.1. KONVENCIONALNI PORIVNI SUSTAVI.....	5
2.2.1. Dizelski motori.....	7
2.2.2. Parne turbine	9
2.2.3. Plinske turbine.....	10
2.2.4. Dizel-električni porivni sustav.....	13
3. RAZLOZI UVOĐENJA ALTERNATIVNIH PORIVNIH SUSTAVA	16
3.1. EMISIJE ŠTETNIH PLINOVA I UTJECAJ NA OKOLIŠ.....	17
3.2. CIJENA NAFTE	18
3.3. UVOĐENJE POREZA NA EMISIJE ŠTETNIH PLINOVA	19
4. ALTERNATIVNI PORIVNI SUSTAVI.....	21
4.1. NEOBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE	21
4.1.1. Nuklearna energija.....	21
4.1.2. Baterije	24
4.1.3. Gorive ćelije	26
4.1.4. Biogoriva	28
4.2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE	30
4.2.1. Energija vjetra.....	30
4.2.2. Solarna energija.....	32
4.2.3. Vodik	33
4.2.4. Amonijak.....	34
4.2.5. Komprimirani zrak i tekući dušik.....	35
5. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA	38
POPIS SLIKA.....	39
POPIS KRATICA	40

1. UVOD

Ovaj rad opisuje osnovna svojstva, prednosti i nedostatke alternativnih tehnologija poriva brodova, u cilju nalaženja optimalnih rješenja kao supstitute trenutnim primijenjenim tehničkim rješenjima.

Povijest pomorskog prometa seže u početke ljudskog razvoja. Otkad postoje ljudi, postoji i želja za znanjem što se nalazi iza obzora. U Australiji prije 45 tisuća godina, dakle davno prije prvih civilizacija, vjeruje se da su ljudi koristili primitivne brodove za lov ribe i manjih sisavaca.

Velik poticaj razvoju pomorskog prometa bila je trgovina. Prve redovne pomorske trgovačke rute nastale su prije 6-6500 godina u Arapskom moru između naroda koji su živjeli na teritoriju današnjih država na Arapskom poluotoku s jedne, i Pakistana i Indije s druge strane. Koristili su male brodove na jedra koji nisu išli predaleko od obale. Vjeruje se da je upravo na području oko ušća rijeke Ind započeo razvoj navigacije kao znanosti. U to doba koristili su uređaj zvan *astrolab* za snalaženje na moru.

Većina današnjih trgovačkih brodova koristi dizelske motore kao primarne pokretače brodskog vijka zbog njihove jednostavnosti i pouzdanosti. To je dobro poznata tehnologija s raširenom mrežom proizvođača, remontnih postrojenja i snabdjevača rezervnih dijelova. Povrh svega, postoji velik broj učilišta koji pripremaju dovoljan broj stručnjaka za upravljanje takvim porivnim sustavima. Međutim, mnogi se u pomorskoj industriji pitaju koliko je današnji sustav održiv. Izazovi su prije svega rastuća cijena goriva, sve stroža regulativa u zaštiti okoliša i uvođenje poreza na emisije štetnih plinova (engl. *carbon tax*).

Oko 95% svjetske trgovine obavlja se morskim putem i trgovački brodovi pritom godišnje potroše 350 milijuna tona goriva te pritom u globalnoj emisiji štetnih plinova sudjeluju do 3%. Iako se uvođenjem učinkovitijih porivnih sustava smanjuje emisija štetnih plinova, oporavak globalnog gospodarstva, a time i trgovine čine dosadašnje napore neznatnim.

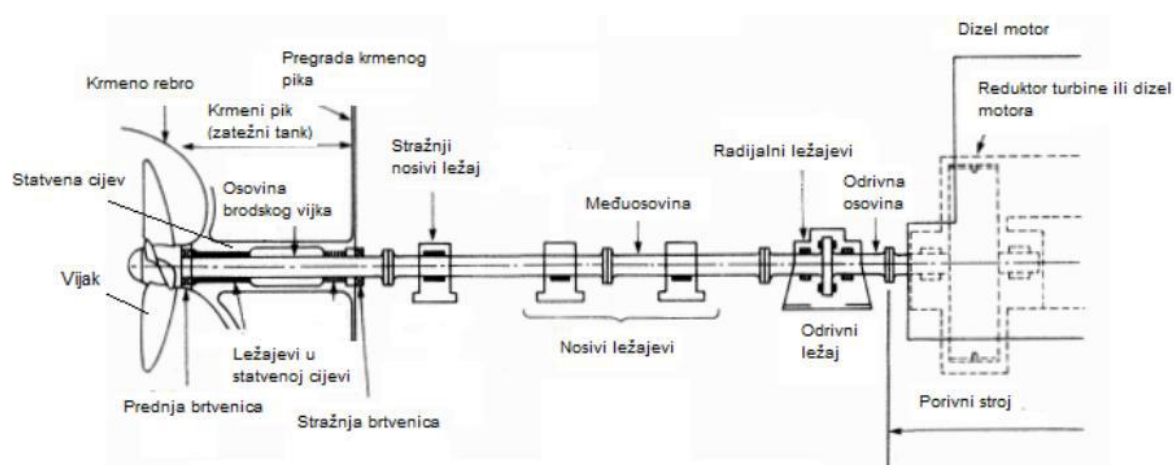
Dakle, problematika rada opisuje moguću primjenu alternativnih rješenja poriva brodova koje imaju optimalne performanse u pogledu štetnog utjecaja na okoliš i ekonomičnosti, odnosno financijske isplativosti. Nadalje, predmet rada jesu alternativne tehnologije poriva brodova i njihove temeljne osobine, odnosno prednosti i nedostaci [2].

Rad podijeljen je na pet poglavlja. Prvi dio rada opisuje postojeće okolnosti i uvjete u sferi pomorske trgovine te nudi objašnjenja negativnih implikacija korištenja dizelskog goriva kao što su emisije štetnih plinova, rastuće cijene nafte i uvođenje poreza na emisije štetnih plinova. Nadalje, drugi dio rada opisuje moguće alternativne porivne sustave, uključujući njihove osobine, prednosti i nedostatke. Naposljetku, posljednji dio rada predstavlja zaključak koji sintetizira glavne nalaze rada.

2. PORIVNI SUSTAV BRODA

Poriv broda ostvaruje se glavnim pogonskim sustavom koji se još naziva propulzijski sustav. Glavni čimbenici pri dizajniranju porivnog sustava broda je odnos između porivnog stroja, transmisijskog sustava i propulzora. Kod trgovačkih brodova kao porivni stroj najčešće se rabe dizelski motori zbog povoljnog stupnja iskoristivosti. Međutim, pored stupnja iskoristivosti propulzijskog stroja važni su i mnogi drugi čimbenici, npr. ekološki, iskoristivost prostora, masa i gabariti porivnog stroja, itd. Zbog toga se za porivne strojeve rabe još: parne turbine, plinske turbine i niz kombinacija dizelskih motora, parnih turbina i plinskih turbina.

U raznim kombinacijama rabe se i elektromotori zbog njihovih povoljnih odlika, kao što je npr. pogodnost ostvarivanja vožnje "naprijed" i "krmom", a čime se ostvaruju dobre manevarske sposobnosti broda. Upravo tip porivnog stroja određuje sam naziv propulzijskog sustava broda. Na slici 1, prikazani su elementi uobičajenog porivnog sustava trgovačkog broda [1].



Slika 1. Osnovne komponente brodskog porivnog sustava [1]

Prema slici 1, osnovni elementi propulzijskog (porivnog) sustava su:

- porivni stroj,
- osovinski vod,
- reduktor i prekretno spojnice (po potrebi),
- propulzor (propeler-brodski vijak).

Zakretni moment kojega stvara porivni stroj, osovinski vod prenosi na brodski vijak koji može imati istu ili različitu brzinu vrtnje od porivnog stroja. Porivni strojevi s malom brzinom vrtnje izravno su priključeni na osovinski vod. Porivni strojevi s većom brzinom vrtnje ($>200 \text{ min}^{-1}$) priključeni na osovinski vod indirektno preko zupčanih prijenosa, reduktora za dobivanje optimalnog broja okretaja broskog vijka. Dakle, prijenos snage s motora na brodski vijak može biti:

- neposredno predavanje snage na brodski vijak,
- predavanje snage reduktorom, koji reducira brzinu vrtnje vratila motora na brzinu vrtnje broskog vijka,
- prijenos reduktorom i prekretnom spojkom, koja omogućuje promjenu smjera vrtnje osovine broskog vijka u odnosu na smjer vrtnje vratila motora.

Pored gore navedenih načina mehaničkog prijenosa snage, na brodovima se susreće i električni prijenos snage, tj. glavnim dizelskim generatorima i osovinskim elektromotorom. Veza između porivnog stroja i broskog vijka ostvaruje se osovinskim vodom.

Osovinski vod sastoji se od niza osovine, tj. od međuosovina i osovine koja nosi brodski vijak-propeler. Njihov broj ovisi o položaju strojarnice. Osovine se spajaju prirubnicama ili rastavljivim spojkama. Osovinu broskog vijka nose ležajevi u statvenoj cijevi koja prolazi kroz krmenu statvu, a međuosovine radijalni ležajevi. Pri vrtnji broskog vijka i stvaranju porivne sile, stvara se aksijalna sila koja se prenosi na osovinu broskog vijka i čitav osovinski vod do odzivnog ležaja.

Na prikladnom mjestu na osovinskom vodu ugrađuje se kraća grebenasta ili odzivna osovina koja porivnu silu prenosi preko temelja odzivnog ležaja na konstrukciju broda. Na suvremenim brodovima, vijak, tj. vijčani propeler, je najrašireniji tip broskog propulzora i gotovo jedino sredstvo poriva.

Može se predočiti kao vijak koji na osovini okreće brodski stroj i tako okrećući se u vodi kao matici, snagu broskog stroja pretvara u kretanje, tj. ostvaruje poriv.

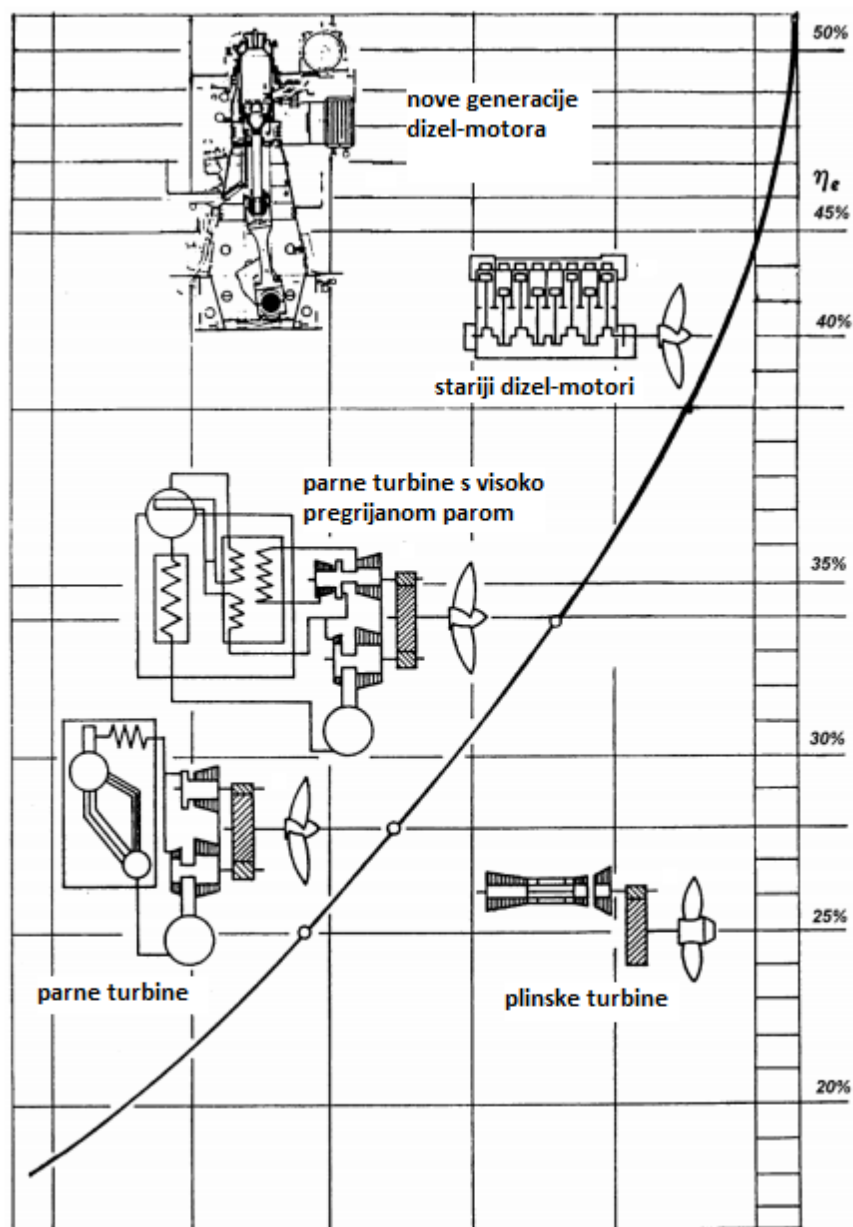
Propulzijski sustav mora biti međusobno uravnotežen, tako da su svi njegovi elementi (vijak, stroj, osovinski vod i kormilo) prilagođeni jedan drugome i čine skladan sustav, što osigurava visok stupanj iskoristivosti uložene energije, odnosno omogućava da uložena energija za gibanje broda zadanom brzinom je što je moguće manja. Istodobno, brod mora imati dobru upravljivost i pomorstvene karakteristike [1].

2.1. KONVENCIONALNI PORIVNI SUSTAVI

Porivni (glavni) stroj predstavlja osnovu svakog propulzijskog sustava. On je izvor mehaničkog rada koji pokreće propulzor kako bi se ostvario poriv broda. Za pogon brodova najčešće se primjenjuju toplinski strojevi, koji koriste kemijsku energiju fosilnih goriva (nafta i prirodni plin). U posljednje vrijeme se na ratnim i putničkim brodova sve više primjenjuje električni prijenos snage od toplinskog stroja do vijka. Toplinski stroj pokreće električni generator, dok je vijak pogonjen elektromotorom.

S obzirom na visoke zahtjeve glede zaštite okoliša, u novije vrijeme se sve više govori o primjeni gorivih ćelija. No, takvi sustavi nisu ekonomski isplativi zbog visokih troškova, kako izgradnje tako i eksploatacije.

Stupanj iskoristivosti za konvencionalna porivna postrojenja prikazan je na slici 2. Kod trgovačkih brodova kao porivni stroj najčešće se rabe dizelski motori zbog povoljnog stupnja iskoristivosti. Međutim, pored stupnja iskoristivosti propulzijskog stroja važni su i mnogi drugi čimbenici, primjerice ekološki, iskoristivost prostora, masa i gabariti porivnog stroja. Zbog toga se za porivne strojeve rabe još parne turbine, plinske turbine i niz kombinacija dizelskih motora, parnih turbina i plinskih turbina. U raznim kombinacijama rabe se i elektromotori zbog njihovih povoljnih odlika, kao što je pogodnost ostvarivanja vožnje “naprijed” i “krmom”. Dizajn ovih tipova porivnih strojeva je složen. Od njih očekuje se visoka učinkovitost, mala težina i kompatibilnost te visoka razina pouzdanosti kao parametra performansi [1].



Slika 2. Stupanj iskoristivosti konvencionalnih porivnih postrojenja [1]

Propulzijske sustave prema porivnom stroju dijelimo na:

- dizelske motore,
- parnoturbinske,
- plinskoturbinske,
- dizelelektrične.

2.2.1. Dizelski motori

Dizelski motori predstavljaju glavni pogonski sustav današnjih brodova. Moguće ih je podijeliti na sporookretne dvotaktne motore, srednjookretne četverotaktne motore te brzookretne četverotaktne motore.

Dvotaktni dizel-motori (slika 3), najčešće se koriste na velikim brodovima kao sporookretni (sporohodni) motori s brzinom vrtnje do 250 okr/min. Imaju najveću jediničnu masu, ali dosežu snage do 100 000 kW uz efektivni stupanj djelovanja do 50%. Spojeni su direktno na osovinu bez reduktora, koriste vijak sa upravljivim usponom (engl. *Controllable pitch propeller*, kratica: CPP) ili vijak s nepromjenjivim usponom (engl. *Fixed pitch propeller*, kratica: FPP) te se uglavnom izvode kao prekretni motori [1].



Slika 3. Sporookretni dvotaktni dizelski motor s prednabijanjem [1]

Četverotaktni dizel-motori (slika 4), mogu biti izvedeni kao srednjookretni (250 - 750 okr/min) ili kao brzookretni (750 - 1500 okr/min) motori. Srednjookretni dizelski

motori imaju jediničnu masu 8 do 22 kg/kW, razvijaju snage do 2000 kW po cilindru te imaju efektivni stupanj iskoristivosti do 50%. Brzookretni dizelski motori imaju jediničnu masu 2 do 4 kg/kW, razvijaju snage do 500 kW po cilindru te imaju iskoristivosti do 40%.



Slika 4. Srednjookretni četverotaktni dizel motor [1]

Razvoj sporookretnih i srednjookretnih dizelskih motora ubrzan je 60-ih i 70-ih godina potrebom da se potrošnja goriva i maziva smanji. Međutim, početkom 90-ih, njihov razvoj se usredotočio na zaštitu okoliša. Cilj je bio smanjiti ispuštanje dušikovih i sumporovih oksida (NO_x i SO_x) i to:

- niskom razinom izgaranja NO_x , prilagodljiva bregasta osovina,
- promjenjivim upravljanjem usisnim ventilima,
- poboljšanim dizajnom komore za unutarne sagorijevanje,
- povećanjem mehaničke čvrstoće konstrukcije motora,
- većim tlakom izgaranja goriva,
- razvojem dvostupanjskog prednabijanja,
- recirkulacijom ispušnih plinova,
- miješanjem goriva s raznim aditivima,
- emulifikacija goriva,
- uvođenje vlažnog zraka ili ubrizgavanje vode,
- korištenjem goriva sa smanjenim udjelom sumpora (za manje emisije SO_x) [2].

Najnoviji dizajn brodova na dizelski pogon uključuje razvoj motora s jako velikim hodom. Takvi brodovi plove manjom brzinom te ukoliko plove s optimalnom veličinom brodskog vijka, mogu dovesti do ušteda u potrošnji goriva.

Prednosti korištenja dizelskih motora na brodovima su:

- dobro poznata tehnologija,
- postojanje velikog broja učilišta za razvoj inženjera potrebnih za upravljanje takvim sustavima,
- proizvođači imaju dobro razvijenu mrežu distributera rezervnih dijelova i inženjera potrebnih za eventualne popravke,
- dizelskog goriva ima u cijelom svijetu te se lako nabavlja,
 - dizelski motori dobro se ponašaju u praktički svim situacijama.

Nadalje, nedostaci njihovog korištenja su:

- ispuštaju štetne plinove, organske tvari i mikročestice,
- potrebna je skupa tehnologija za prilagođavanje novim ekološkim standardima,
- prva generacija biogoriva našla se pomiješana s dizelom u mnogim lučkim rezervoarima te njihov utjecaj na dizelske motore nije još u potpunosti ispitan [2].

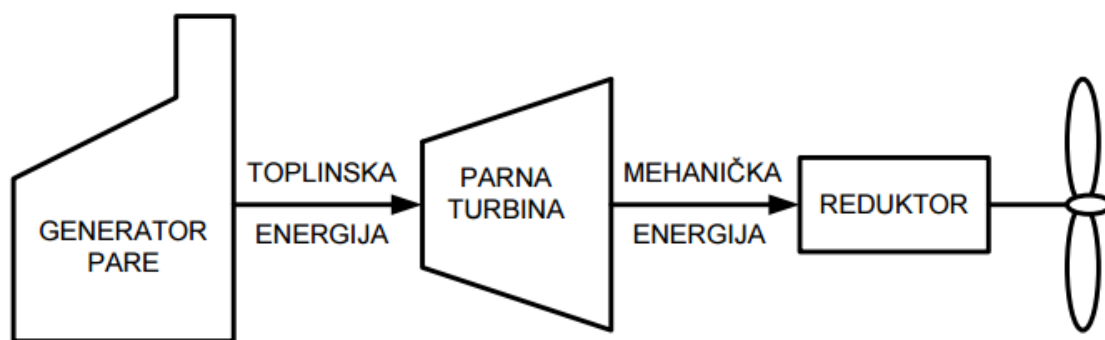
2.2.2. Parne turbine

Parne turbine su strojevi koji energiju sadržanu u pari pretvaraju u mehaničku energiju. Potencijalna energija sadržana u pari pretvara se najprije u kinetičku energiju i to ekspanzijom u sapnicama ili privodnim lopaticama u statorskom dijelu turbine, a potom se vođenjem kroz zakrivljeni strujni kanal na rotoru turbine izaziva sila koja zakreće rotor što rezultira mehaničkim gibanjem.

Parna turbina se upotrebljava na brodovima kao porivni pogonski stroj kada potrebna snaga poriva prelazi 40 000 kW, ali i kao pomoćni uređaj za pogon električnih generatora te za pogon pumpi tereta na tankerima. Grade se do snaga od oko 100 000 kW, dok se na ratnim brodovima grade do snaga od blizu 300 000 kW.

Parne turbine se uglavnom koriste na velikim tankerima, ratnim brodovima i nekim putničkim brodovima zbog razvijanja velikih brzina broda i malih vibracija u usporedbi s vibracijama dizel-motornih postrojenja.

Na slici 5, shematski je prikazana struktura i osnovne komponente parnoturbinskog porivnog sustava.



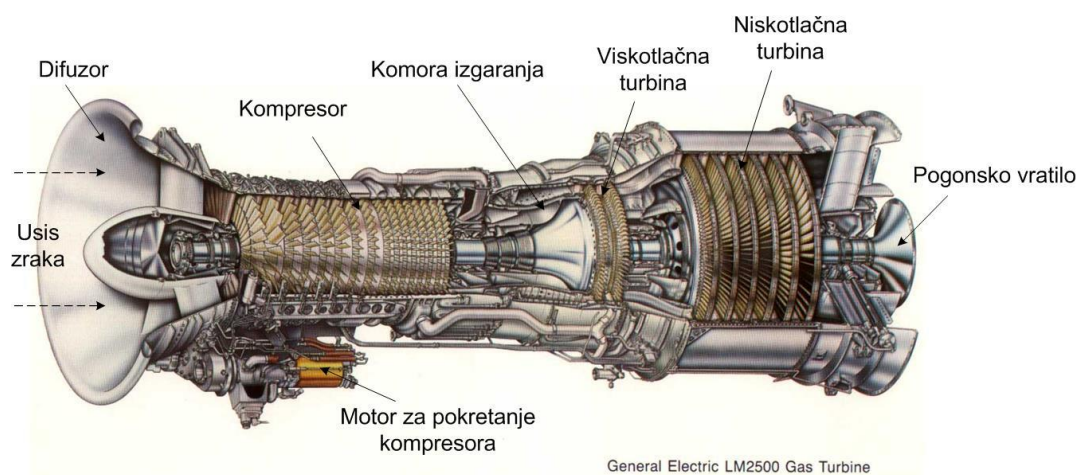
Slika 5. Shematski prikaz parnoturbinskog sustava [1]

Parna turbina koristi toplinsku energiju pare pod tlakom, dobivenu u generatoru pare (brodski kotao) i pretvara je u mehaničku energiju. Snaga na turbini se prenosi iz rotora turbine na njihove redukcijske zupčanike. Visokotlačna i niskotlačna turbina imaju isti sustav prijenosa koji završava na glavnom zupčanicu, a koji dalje izlaznu snagu prenosi na osovinski vod i brodski vijak.

2.2.3. Plinske turbine

Plinske turbine prvi put su korištene za pogon ratnih brodova pedesetih godina prošlog stoljeća i to kako bi se omogućilo postizanje velikih brzina kod borbenog djelovanja. Sljedeću operacijsku prednost predstavlja relativna lakoća s kojom su plinske turbine mogle startati i zaustaviti se, što je rezultiralo mogućnošću vrlo brzog postizanja visokih stupnjeva snage. Plinske turbine mogu se koristiti u čistom mehaničkom pogonu ili pak alternativno, za proizvodnju struje, koja se potom koristi za rad porivnog elektromotora. To je dalo poticaj razvoju hibridnih pogonskih rješenja kao što su CODELOD i CODELAD, koji svoju primjenu nalaze na suvremenim ratnim brodovima. Pedesetih godina prošlog stoljeća, Shell je eksperimentirao s plinskim turbinama u tankeru "Auris", dok je *liberty* brod "John Sergeant" naknadno pušten s industrijskom plinskom turbinom. Kasnije, oko 1968. godine sagrađen je RO-RO brod "Adam W.M Callaghan" s dvije zračno izvedene Pratt&Whitney FT4 plinske turbine i unajmljen je od strane USN Sea Lift-a. Godine 1971. brod za prijevoz kontejnera "Euroliner", također opremljen s dvije Pratt&Whitney FT4 plinske turbine, plovio je između Amerike i Europe. Slijedio je

trajekt velike brzine s dvostrukim vijkom "Finnjet" 1977, a poslije su u 2000-im predstavljeni i kruzери, uključujući Millenium Class i Queen Mary 2. U trgovačkoj mornarici ovi posljednji brodovi dizajnirani su kao kombinacija plinskih turbina i dizel-električnih generatora. Jedna od najraširenijih izvedbi plinske turbine izvedba je s otvorenim procesom prikazano na slici 6.



Slika 6. Plinska turbina s otvorenim procesom [1]

Suvremene parne turbine dizajnirane su za izgaranje komercijalno dostupnih goriva koji udovoljavaju trenutnoj zakonskoj regulativi o emisiji štetnih plinova. Destilirana goriva su, međutim, znatno skuplja, od konvencionalnih brodskih goriva koja sagorijevaju u dizel motorima kod brodova trgovačke mornarice. Sljedeća varijacija tehnologije plinskih turbina je kombinacija plinske turbine s toplinski obnovljivom parnom turbinom, koju pokreću dimni plinovi, omogućujući veću sveukupnu toplinsku efikasnost. Prema gore navedenom, ova tehnologija ima svoje prednosti i nedostatke [1].

Prednosti plinskih turbina predstavljaju sljedeće:

- predstavljaju dokazano visoku učinkovitost kao pogonska tehnologija,
- njihova mala težina postrojenja daje znatnu fleksibilnost pri postavljanju u brod,
- emisije NO_x su male, dok su SO_x emisije neznatne zbog visokog stupnja izgaranja goriva,
- održavanje se izvodi normalno, praćenjem radnih sati,
- turbine se relativno lako mogu zamijeniti na brodu.

Nedostaci su sljedeći:

- gorivo za plinske turbine je skuplje u usporedbi s trenutnom cijenom nafte,
- sve plinske turbine imaju manji učinak, proporcionalno s rastom temperature,
- toplinska efikasnost je manja u usporedbi s dizelskim motorima i sličnim napajanjima [1].

Prirodni plin kao pogonsko gorivo nije novi koncept, međutim razvojem dualnog dizel-električnog sustava na LNG brodovima postignut je velik korak naprijed. Metan CH_4 spoj je s najvećim udjelom u LNG-u te kada se koristi kao gorivo, ispušta za 25% manje CO_2 u atmosferu. Također, zbog niske temperature izgaranja i manjeg omjera dušikovih spojeva u gorivu, ispuštanje NO_x spojeva u atmosferu smanjeno je za 85%. Brodovi na takav pogon zadovoljavaju nove ekološke standarde. Kad je plin kondenziran, potreban je otprilike 4 puta veći spremnik nego za konvencionalna goriva.

Motori na dualni pogon imaju više od milijun sati prije remonta, što ukazuje na veće očuvanje motora te njegov životni vijek. Također, prostor u motoru za izgaranje goriva mnogo je čišći te su problemi s nusproduktima izgaranja mnogo manji.

Mnoga postrojenja na kopnu prebacila su se na plinski pogon zbog mnogih ekoloških restrikcija. Takva konverzija moguća je i na brodovima. Nedavni primjer predstavlja brod za prijevoz kemikalija m/b Bit Viking koji je modificirao svoja dva dizelska motora da rade na LNG. Da bi mogao funkcionirati autonomno 12 dana bez pristajanja noseći pritom 80% tereta, na palubu su instalirana dva spremnika kapaciteta 500m^3 , što je prikazano na Slici 7 [1].



Slika 7. Brod za prijevoz kemikalija m/b Bit Viking [2]

Prednosti LNG-a odlikuju se u sljedećem:

- postoje značajne pogodnosti u smislu smanjenja emisija CO_2 , NO_x , SO_x ,
- tehnologija za prilagodbu postojećih motora novim pogonskim mogućnostima već postoji,
- tehnologija za prilagodbu relativno je jeftina,
- LNG trenutno je jeftiniji od ostalih pomorskih goriva.

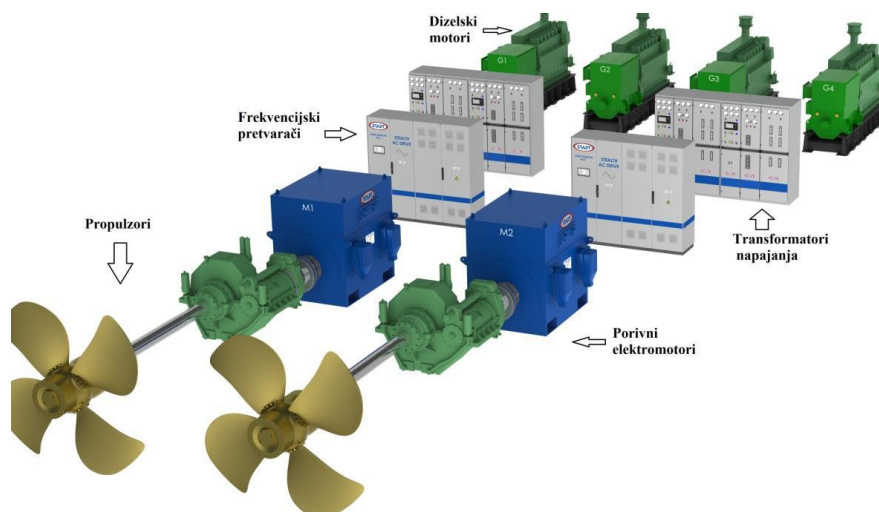
Nadalje, nedostaci LNG-a su sljedeći:

- potrebno je osigurati dobru zabrtvljenost motora modificiranih da rade na LNG i to zbog mogućnosti curenja plina,
- trenutni velik problem predstavlja manjak infrastrukture za prihvat ovih brodova,
- potreban je izvor topline da bi LNG došao na temperaturu potrebnu za izgaranje [2].

2.2.4. Dizel-električni porivni sustav

Ovi sustavi se primjenjuju na brodovima s velikim zahtjevima za potrošnjom električne energije, dobrom manevarskom sposobnosti i čestim promjenama brzine kao što su putnički brodovi, trajekti, ledolomci, brodovi za polaganje cjevovoda i kabela i platforme.

Na slici 8., prikazana je shema suvremenog dizel-električnog porivnog sustava.



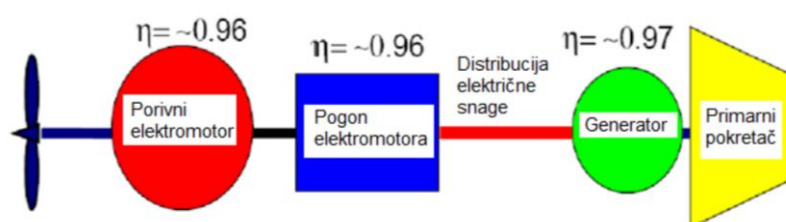
Slika 8. Suvremeni dizel-električni porivni sustav [1]

Današnji sustavi električne propulzije broda izvedeni su u koncepciji broda s potpuno integriranim elektroenergetskim sustavom (engl. *Integrated Full Electric Propulsion*, IFEP), a koji se sastoji od slijedećih osnovnih cjelina:

- brodski vijak : s fiksnim ili s upravljivim usponom, a u novije vrijeme zakretni podtrupni potisnici,
- propulzijski motor (istosmjerni, izmjenični: sinkroni ili asinkroni)
- pretvarač frekvencije: tiristorski kontrolirani istosmjerni pogon, sinkrokonverter, ciklokonverter),
- izmjenični sinkroni generator,
- srednjohodni dizel motor (primarni pokretač),
- propulzijski transformatori, glavna sklopna ploča, te sustav automatizacije i upravljanja.

U koncepciji broda s potpuno integriranim elektroenergetskim sustavom (IFEP) pretpostavlja četiri stupnja konverzije energije (slika 9):

1. Mehaničko-električnu konverziju u sinkronim generatorima.
2. Transformaciju napona u propulzijskim transformatorima.
3. Regulaciju frekvencije i napona u propulzijskim pretvaračima frekvencije i transformatorima.
4. Električko-mehaničku konverziju u propulzijskim elektromotorima.



Slika 9. Učinkovitost kod četiri faze električnog prijenosa energije [1]

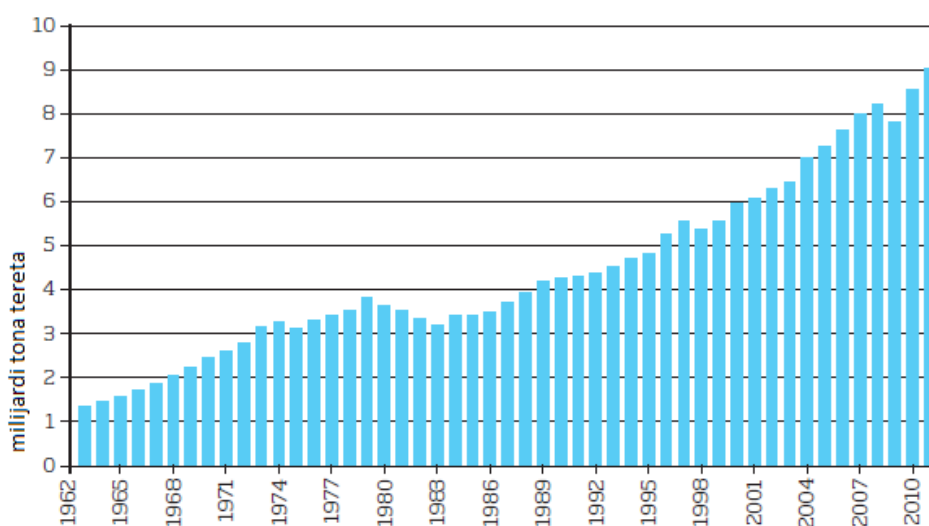
U električnom prijenosu energije do broskog vijka sveukupno se izgubi između 8 i 12 % snage. Električna energija se dovodi na porivne elektromotore frekventnim pretvaračima koji omogućuju promjenu broja okretaja. Transformatori omogućavaju podjelu elektrosustava na različite naponske razine. Kod ovakvog sustava brodski propeler je pogonjen pomoću elektromotora. Koristi se načelo elektrane, odnosno visokonaponska

brodska mreža. Tipični visoki naponi koji se koriste u pomorstvu su 3; 3,3; 6; 6,6; 10; 11; i 15 kV (za frekvencije 50 i 60 Hz) . Pogonski stroj je uglavnom dizelski motor, dok su parna turbina i plinska turbina znatno manje u primjeni.

Prednosti dizel-električnog sustava su: niska razina buke i vibracija, nema reduktora, smanjenje potrošnje goriva, smanjenje emisije štetnih plinova, povećanje broskog prostora za teret, visok stupanj raspoloživosti pogona broda, bolja manevarska svojstva te manja opasnost od požara. Nedostaci su manja korisnost zbog višestruke pretvorbe energije, viša cijena početnih ulaganja i eksploatacije te veća masa postrojenja i velik broj potrebnog visokokvalificiranog osoblja za nadzor i rukovanje sustavom [1].

3. RAZLOZI UVOĐENJA ALTERNATIVNIH PORIVNIH SUSTAVA

Većina današnjih trgovačkih brodova koristi dizelske motore kao primarne pokretače brodskog vijka zbog njihove jednostavnosti i pouzdanosti. To je dobro poznata tehnologija s raširenom mrežom proizvođača, remontnih postrojenja i snabdjevača rezervnih dijelova. Također, postoji velik broj učilišta koji pripremaju dovoljan broj stručnjaka za upravljanje takvim porivnim sustavima. Međutim, mnogi se u pomorskoj industriji pitaju koliko je današnji sustav održiv. Izazovi su prije svega rastuća cijena goriva, sve stroža regulativa u zaštiti okoliša i uvođenje poreza na emisije štetnih plinova (engl. *carbon tax*). Slika 10, prikazuje kretanje obujma pomorske trgovine od 1962. do 2010. godine.



Slika 10. Kretanje obujma pomorske trgovine od 1962. do 2010. godine [2]

Kao što je vidljivo iz slike 10, pomorska trgovina je u promatranome razdoblju zabilježila pozitivan trend kretanja. Nadalje, sve analize ekonomskih stručnjaka sugeriraju da će se trend rasta trgovine nastaviti i u srednjoročnom periodu, stvarajući dodatni pritisak na okoliš.

U nastavku slijedi detaljni prikaz spomenutih ograničenja koja dovode u pitanje održivost sadašnjeg sustava u sferi tehnologija poriva brodova te kao takvi predstavljaju svojevrsnu motivaciju za promjenama [2].

3.1. EMISIJE ŠTETNIH PLINOVA I UTJECAJ NA OKOLIŠ

Staklenički plinovi kao što su ugljikov dioksid CO_2 , dušikovi oksidi (NO_x) i sumporovi oksidi (SO_x) izazivaju efekt staklenika, a posljedično i globalni rast temperature. Dvanaest najtoplijih godina od kada postoje službena mjerenja globalne temperature su bila u zadnjih 20 godina (Slika 11). Zaključak znanstvene zajednice jest da se promjene događaju, ali nema zaključka što je tomu uzrok.

RANK 1 = WARMEST PERIOD OF RECORD: 1880–2016	YEAR	ANOMALY °C	ANOMALY °F
1	2016	0.94	1.69
2	2015	0.90	1.62
3	2014	0.74	1.33
4	2010	0.70	1.26
5	2013	0.67	1.21
6	2005	0.66	1.19
7	2009	0.64	1.15
8	1998	0.63	1.13
9	2012	0.62	1.12
10 (tie)	2003	0.61	1.10
10 (tie)	2006	0.61	1.10
10 (tie)	2007	0.61	1.10

Slika 11. Rezultati službenih mjerenja globalne temperature u zadnjih dvadeset godina [2]

Iako postoji mišljenje pojedinih znanstvenika kako globalno zatopljenje nije posljedica čovjekova utjecaja na klimu, već isključivo stvar cikličke prirode klimatskih promjena, velika većina ih se ipak slaže da je utjecaj čovjeka velik te da bi ga trebalo na globalnoj razini nekako regulirati.

Prvi značajniji sporazum predstavlja Protokol iz Kyota za čiju je implementaciju bilo potrebno minimalno 55 država koje su odgovorne za minimalno 55% zagađenja. Protokol je stupio na snagu 16. veljače 2005. godine. Sporazumom je predviđeno smanjenje šest stakleničkih plinova: ugljikovog dioksida, metana, dušikovog oksida, fluoriranih ugljikovodika, perfluoriranih ugljikovodika i heksafluorida.

Nevoljkost država da se drže protokola te nemogućnost međunarodne zajednice da kazne iste, navela je određene države i zajednice država da donesu vlastita pravila pa tako

Europska Unija donosi vlastitu direktivu zvanu Europski program za klimatske promjene (engl. *European Cluster Collaboration Platform*, kratica: *ECCP*) te postavlja svojim članicama još strože ciljeve.

Zadnji i dosad najznačajniji međunarodni sporazum zove se Pariški sporazum. Stupio je na snagu 4. listopada 2016. Godine, te ima sljedeće ciljeve:

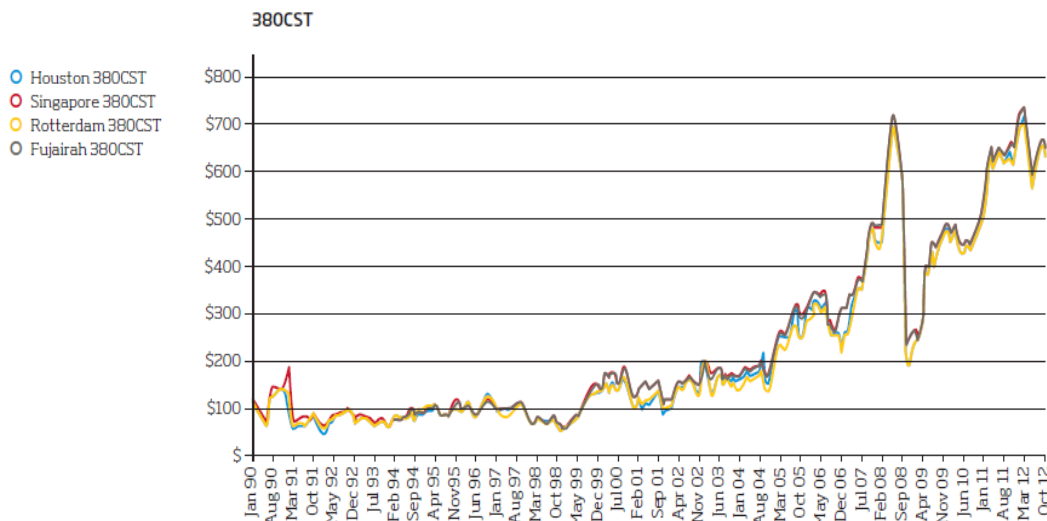
- povećati globalne prosječne temperature na 2°C iznad razina u predindustrijskom razdoblju te poduzeti mjere u svrhu ograničavanja rasta globalne prosječne temperature 1,5°C iznad razina u predindustrijskom razdoblju,
- povećati sposobnost prilagodbe posljedicama klimatskih promjena i poticati smanjenje emisija stakleničkih plinova na način kojim se ne ugrožava proizvodnja hrane,
- osigurati financiranje projekata koji smanjuju emisiju stakleničkih plinova i povećavaju otpornost na klimatske promjene.

Trenutno se samo tri države nalaze izvan toga sporazuma i to SAD, čiji je sadašnji predsjednik Donald Trump izašao iz sporazuma s tvrdnjom da ugrožava američki gospodarski rast, Sirija zbog međunarodne izolacije i unutarnjih sukoba i Nikaragva koja smatra da sporazum nije dovoljno ambiciozan.

Osim gore navedenih sporazuma koji se tiču cjelokupnog globalnog gospodarstva, doneseni su i međunarodni sporazumi namijenjeni isključivo pomorskoj industriji. Najznačajniji među njima jest Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova (engl. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*, kratica: *MARPOL*). Taj sporazum je namijenjen zaštiti priobalja od izlivanja nafte, kemijskih tvari te balastnih voda, kao i zaštiti flore i faune te zaštiti od onečišćenja zraka. Zahtjevi su veliki, a nacionalne kazne, ovisno o pojedinačnoj državi, znaju biti rigorozne [2].

3.2. CIJENA NAFTE

Cijena nafte predstavlja najznačajniju stavku u operativnim troškovima velike većine brodskih kompanija. Ona se može kretati između 50 do 60% operativnih troškova i značajno utjecati na cijenu prijevoza. Cijena plavog dizela (engl. *bunker fuel*) pokazuje značajne fluktuacije kroz posljednjih 20 godina koje se pojavljuju na svim tržištima, što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Kretanje cijene plavog dizela na različitim tržištima [2]

Kao što je vidljivo, spomenuta slika također prikazuje i rast srednje cijene plavog dizela kroz posljednjih 20 godina i taj rast je u direktnoj korelaciji s rastom cijene nafte na svjetskim tržištima. Shvaćajući da nafta nije neograničeni resurs te da će u jednom trenutku potražnja premašiti ponudu, pogotovo zbog rastućih ekonomija Kine, Indije, Brazila, Indonezije i drugih, mnogi se boje da bi cijena mogla „skočiti u nebo“. Taj se trenutak stalno odgađa prije svega zbog novih metoda za otkrivanje nafte, novih tehnologija za crpljenje nafte. Od novih tehnologija su najznačajniji nafta i plin iz škriljevca dobiveni metodom hidrauličkog frakturiranja (engl. *fracking*) te nafte iz kanadskog naftnog pijeska (engl. *tar sand*).

3.3. UVOĐENJE POREZA NA EMISIJE ŠTETNIH PLINOVA

Povodom uvođenja Pariškog sporazuma o zaštiti klime, Međunarodni monetarni fond (engl. *International Monetary Fund*, kratica: MMF) sugerira da se uvede poseban porez na emitere štetnih plinova. Prijedlog je da taj porez iznosi 30 dolara po toni ispuštenog štetnog plina, što bi generiralo 25 milijardi dolara na globalnoj razini[10]. Ideja je da se tako prikupljen novac uloži u istraživanje novih tzv. zelenih tehnologija i sanaciju postojećih onečišćenja uzrokovanih pomorskim prometom. Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization*, kratica: IMO) tome se protivi iz razloga što bi takav porez doveo industriju u nepovoljan položaj budući da bi plaćala tri

puta veći porez od kontinentalnih industrija. Umjesto toga zalaže se za, ukoliko je to nužno, dodatne trošarine u cijeni goriva. Mnogi su svjesni da borba s MMF-om, postaje uzaludna i da je porez neminovan te su se počeli pripremati na taj scenarij [2].

4. ALTERNATIVNI PORIVNI SUSTAVI

Alternativne tehnologije poriva brodova kao što samo ime govori su moguća alternativa konvencionalnim tehnologijama poriva brodova. Zbog rastućih cijena goriva, emisije štetnih plinova i zagađenja okoliša, uvijek se težilo pronaći rješenja, koja bi bila manje štetna za okolinu i koja bi svojim performansama mogla konkurirati današnjim izvedbama porivnih sustava. Prema tome, takve tehnologije bi mogli podijeliti na: neobnovljive i obnovljive izvore energije.

4.1. NEOBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Neobnovljivi izvori energije trenutno su najizglednija alternativa današnjim porivnim sustavima. Zbog svojih karakteristika i skoro nikakve emisije štetnih plinova u atmosferu, već se polako integriraju kod trgovačkih brodova.

4.1.1. Nuklearna energija

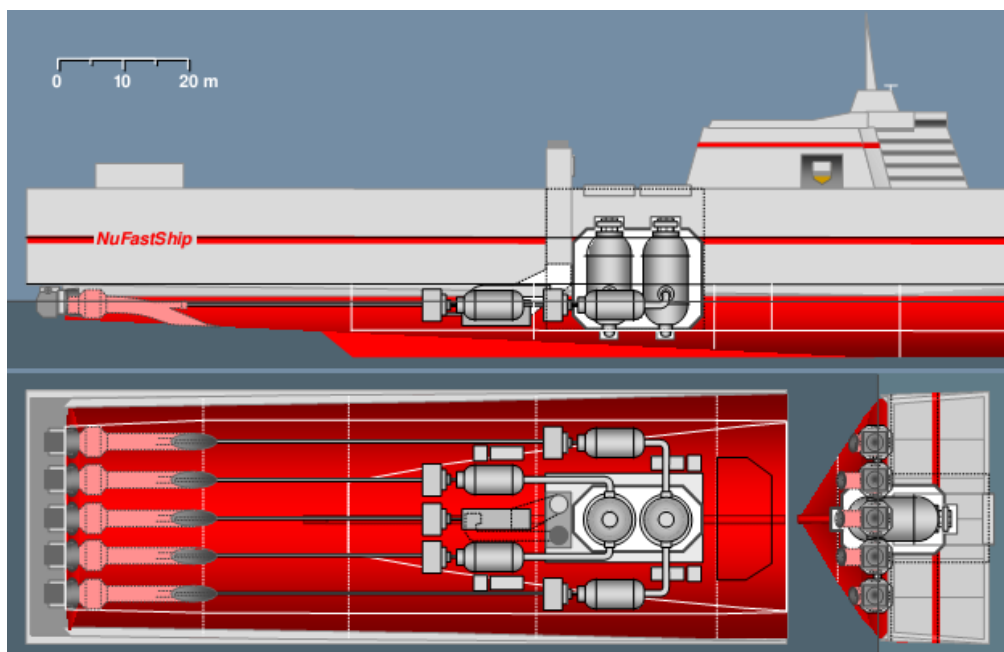
Postojeći sustavi skladištenja i sustavi generiranja snage pretežno su razvijeni na način da razbijaju kemijske veze među atomima. Suprotno tomu, nuklearna reakcija je fisija velikih, teških jezgri u manje fisijske produkte pod kontroliranim lančanim reakcijama. To oslobađa velike količine toplinske energije koja se prenosi preko rashladnih reaktora za generiranje korisne snage putem termodinamičkog sustava. Nuklearni pogon predstavlja potencijalno rješenje za pogon bez emisije CO₂. Trenutno postoji nekoliko potencijalnih goriva, modula fisije i rashladnih reaktora koji bi se mogli koristiti za pogon trgovačkih brodova. Međutim, najčešći tip reaktora predstavlja reaktor s vodom pod tlakom, koji koristi uran kao gorivo. Prirodni uran sadrži tri izotopa: U²³⁸ 99,3%, U²³⁵ 0,7% i U²³⁴ 0,005%. Fisijska komponenta u gorivu je U²³⁵, gdje se neutroni emitirani u fisijskom procesu usporavaju putem rashladne tekućine (voda) prije nego se pokrene fisija u sljedećem atomu U²³⁵. Dobivena energija putem rashladne tekućine prenosi se u sekundarni parni sustav koji generira električnu ili direktnu snagu za poriv. Sljedeći potencijalni izvor fisijskog urana jest torij kojeg ima mnogo više nego urana i nalazi se u zemlji s koncentracijom od oko 6‰. U različitim krajevima svijeta počela su se provoditi istraživanja na koji način proizvesti odgovarajući reaktor za ovu vrstu goriva. Tijekom

vremena razvile su se elektrane koje proizvode do 4.5 GW toplinske energije i 1 do 1.6 GW električne energije. Međutim, to su ipak prevelike instalacije za ugradnju na brodovima. Ipak, u posljednje vrijeme pojavio se veliki interes za nove, manje modele reaktora. Spomenuti reaktori mnogo su manji od industrijskih reaktora. Postoji nekoliko dizajna manjih reaktora koji su prikazani na slici 13.

Small reactor designs	Country of manufacture	Power output (MWe)
KLT 40S	Russia OKBM	35
VBER 150	Russia OKBM	110
SMART	South Korea KAERI	100
MRX	JAERI	30
SMR	United States of America Westinghouse	200
mPower	United States of America B+W	125
NuScale	United States of America NuScale Power	45

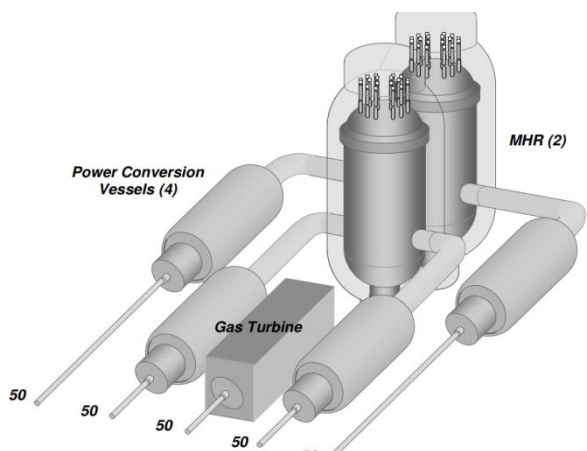
Slika 13. Tipovi dizajna manjih reaktora [2]

Kako bi se dizajnirao i sagradio trgovački brod na nuklearni pogon, potrebne su značajne promjene i procesi u odnosu na standardne brodove. Sigurnosne procedure obuhvaćale bi nuklearne, mehaničke, elektrotehničke i morske prilagodbe za konstrukciju broda. Takvim konceptom brod bi se praktički odvojio na više zasebnih cjelina, od kojih bi neke imale prave, a neke virtualne granice. Koncept „FastShip“ (slika 14), podrazumijeva vrlo brzi transportni sustav za trgovačku mornaricu od četiri broda poludeplasmanskog oblika trupa. Takva izvedba geometrije trupa je tipična za manje, brze brodove, koji imaju jaki i učinkoviti porivni sustav. Smišljeni su od strane kompanije Thomycroft, Giles and Co., za brodarsku kompaniju FastShip Atlantic Inc. of Virginia, u suradnji sa MIT-ovim (eng. *Massachusetts Institute of Technology*- kratica: MIT) odjelom za oceanski inženjering, za dizajn trupa broda i simulacije plovidbe broda. Njihova maksimalnu brzinu je 42 čvora, dok bi ekonomska brzina iznosila oko 37 čvorova. Snaga porivnog stroja je 250 MW, ostvarena preko pet plinskih turbina. Cijena takvog broda iznosi preko dvjesto milijuna američkih dolara [5].



Slika 14. Nacrt nuklearno-plinskog postrojenja za "FastShip" koncept [5]

Od dosadašnjih standardnih nuklearnih reaktora, za komercijalnu primjenu u brodarstvu, kao učinkovit porivni sustav (slika 15), odabran je plinsko-turbinski sa helij reaktorom (engl. *Gas Turbine Modular Helium Reactor*, kratica: GT-MHR). Takav hibridni reaktor je opremljen sa dva helij reaktora, snage 210MW, od kojih je svaki uparen sa po dva generatora snage 50MW, za plovidbu broda, a kao dodatak imaju i središnju plinsku turbinu snage 50MW za manovru [5].



Slika 15. Nuklearno-plinski hibridni sustav [5]

U bilo kojoj budućoj gradnji trgovačkog broda na nuklearni pogon, trebala bi postojati suradnja između IMO-a i Međunarodne agencije za atomsku energiju (engl. *The International Atomic Energy Agency*, kratica: IAEA), koja bi sa svojim opsežnim istraživanjima i stručnim kadrom, uspjela uskladiti regulacije za dizajn i sigurnost broda u njegovoj eksploataciji. Dodatni zahtjevi odnosili bi se na primjenu pravila za kopnena postrojenja, koja bi se koristila kao podrška reaktorima na brodu. Nuklearni poriv kao alternativna tehnologija, ima svoje prednosti i nedostatke [2].

Prednosti predstavljaju sljedeće:

- brod na nuklearni pogon tijekom rada ne emitira CO₂, NO_x, SO_x niti lako hlapljive organske čestice,
- koncepti nuklearne elektrane odgovaraju i kao koncept za poriv trgovačkih brodova,
- manji modeli reaktora ili reaktori s rastaljenom soli mogli bi ublažiti mnoge probleme i poteškoće povezane s nuklearnim porivom,
- nuklearni poriv omogućio bi daljnju fleksibilnost u planiranju i dizajniranju trgovačkih brodova,
- početni troškovi goriva su veliki ali omogućuju eksploataciju na duže vrijeme pa samim time ne ovise o fluktuaciji cijene goriva na tržištu.

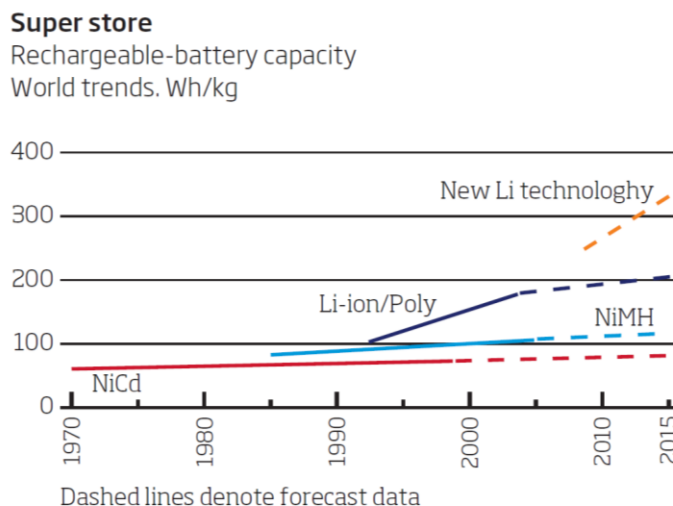
Nadalje, nedostaci su sljedeći:

- standardni pristup kod planiranja, gradnje i eksploatacije trgovačkih brodova zahtijevat će kompletnu promjenu budući da se tom problemu mora pristupiti na osnovu procjene sigurnosti (rizika),
- postoji velik broj ograničenja proizašlih iz dizajna i operativnih ciklusa broda,
- postoji mali broj eksperata u polju nuklearnog pogona,
- prema konvencionalnim metodama brodskih poriva, primjena nuklearnog poriva zahtijevat će donošenje novih rezolucija,
- mogući terorizam predstavlja velik problem za trgovačke brodove [2].

4.1.2. Baterije

Olovna akumulatorska baterija, suhe ćelije cinkovog ugljika i kadmij nikal baterije bili su najčešći tip baterija u posljednjih 150 godina. Tijekom toga razdoblja doživjele su neznatan razvoj. Kao sredstvo pohrane energije, imaju malu gustoću snage, sporo punjenje i samopražnjenje. U posljednje vrijeme dogodio se značajan napredak u tome smjeru.

Snaga i količina energije postaje mnogo veća. Spomenuti noviji tipovi baterija mogu se puniti mnogo brže, imaju nižu stopu samopražnjenja i slobodne su od tzv. memorijskog efekta, što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Svjetski trend u kapacitetu punjive baterije [2]

Pored poboljšanja njihovih performansi, one još uvijek ne zadovoljavaju potrebe nužne za poriv broda. Naime, velike snage moguće je ostvariti samo za kraća putovanja od nekoliko dana. Nove kemijske baterije uključuju dvije izvedbe; metal-sumpor, natrij ili litij i metal-kisik (metal-zrak). Trenutno je najzastupljenija litijska baterija. Ona predstavlja budućnost u razvoju poriva broda na baterije. Mnoge kompanije u Japanu, Kini, Južnoj Koreji, Europi i Americi smatraju da se te izvedbe baterija mogu značajno unaprijediti. Trenutno se značajno financiraju istraživanja u smjeru napretka litij-ionskih baterija. Problem predstavlja jedino dostupnost te sirovine, koja je ograničena. Postoje naznake da rezerve sirovine litija ima između 10-11 milijuna tona, koje se u velikoj količini nalaze u Čileu. Ukoliko se nastavi razvoj tih baterija, uskoro bi se trebao očekivati značajan porast cijene litija te bi se trebala naći neka alternativa koja bi zamijenila isti. Prema nekim naznakama to bi trebala biti magnezij-ska-ion baterija. Istraživanja su pokazala optimistične rezultate, uz korištenje novih katodnih materijala.

Najnovija tehnologija, koja je proizašla sa Stanfordskog sveučilišta jest AEB (engl. *All-electron battery*) za koju se tvrdi da ima mnogo veću snagu i energiju od postojećih kemijskih baterija. U skladu s postojećom tehnologijom, pohrana energije bazirana na superkapacitoru ugrađena je na manji putnički brod „Ar Vag Tredan“. Ovaj brod putuje

na liniji dugoj 2.5 NM u zaštićenim vodama i postiže maksimalnu brzinu 10 čvorova. Superkapacitatori mu dozvoljavaju jednosmjerno putovanje [2].

S obzirom na navedene informacije, možemo navesti prednosti i nedostatke baterija, kao alternativno rješenje porivnog sustava.

Prednosti su sljedeće:

- porivi brodova na baterijskoj bazi, nemaju problem s izgaranjem i emisijom štetnih plinova i čestica,
- u odnosu na rapidni razvoj tehnologije predstavljaju potencijalno rješenje poriva malih do srednjih brodova,
- baterije u vezi s drugim modelima propulzije mogu ponuditi potencijalna hibridna rješenja.

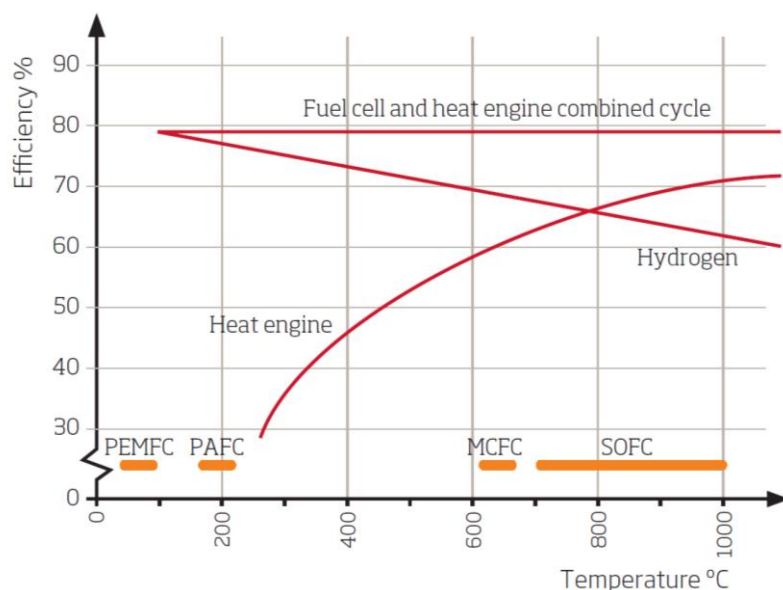
Nedostaci se očituju u sljedećem:

- Zbog potrebne količine prostora za pohranu trenutno mogu poslužiti jedino na malim brodovima i kratkim relacijama,
- brodovi na potpuni baterijski pogon trebaju čekati daljnji napredak tehnologije,
- baterijski paket zahtjeva potpunu zamjenu kad mu istekne rok punjenja/pražnjenja.

4.1.3. Gorive ćelije

Izumljene 1838.godine, gorive ćelije predstavljaju preteču četverotaktnom Otto i dizelskom motoru. Nešto više od stoljeća nisu postojali ni potreba ni interes za razvijanjem ove tehnologije. Interes se pobudio tek kada su počele utrke između nacija u osvajanju svemira. Razlog tomu bila su tri čimbenika: njihova masa je mala, jedini produkt izgaranja je voda, dok je razvijena tehnologija materijala bila dovoljna za postizanje visoke učinkovitosti. Gorive ćelije, isto kao i baterije, proizvode energiju elektrokemijskim procesom. Nemaju pokretne dijelove, ali zahtijevaju dodatnu opremu kao što su pumpe, ventilatori i ovlaživači. Obično ima dva reaktanta, vodik i kisik, kombinirani s gorivim ćelijama za proizvodnju vode, pri čemu razvijaju električnu i toplinsku energiju. Reaktanti koji koriste gorive ćelije pohranjeni su izvana kao i kod dizelskih motora. U ćelije se direktno ubrizgava plinoviti vodik i kisik. Koristeći zrak, smanjuje se efikasnost, ali se omogućuje besplatna opskrba za razliku od dizelskog motora. Gorive ćelije visokih temperatura imaju velik potencijal za postizanje učinkovitosti kao i veliki dizelski motori,

osobito ukoliko bi se kombinirali s parnim postrojenjima, iz kojih bi se koristila izlazna toplinska energija kao što je prikazano na slici 17.



Slika 17. Teorijski toplinski motor i učinkovitost gorivih ćelija [2]

Glavni problem za gorive ćelije predstavlja njihovo gorivo. Kisik se može dobiti iz zraka, međutim, dobava vodika je malo veći izazov. Postoji opcija direktnog ubrizgavanja vodika, ali njegova pohrana predstavlja problem zbog nedostatka infrastrukture. Moguću primjenu gorivih ćelija kao izvor snage na brodovima je korištenje prirodnog plina za njihov rad. Većina gorivih ćelija visokih temperatura sposobne su raditi direktno na prirodni plin, pretvarajući pritom metan u vodik unutar same gorive ćelije. Nedostatak ovakvog pristupa sastoji se u tome što se ugljik (C) iz goriva pretvara u ugljični dioksid.

Nadalje, *Fellowship* je zajedničko industrijsko istraživanje i razvojni projekt čiji je glavni cilj razvoj i upotreba hibridnih gorivih ćelija koje bi se osobito koristile u području pomorskog prijevoza i odobalne industrije (engl. *offshore*). U to su uključena dva najveća proizvođača dizelskih motora, Wartsila i MTU te klasifikacijsko društvo DNVGL [3].

Ovaj projekt uspješno je ugradio motor na hibridni pogon, pogonjen prirodnim plinom, snage 330 kW, na brod „Viking Lady“ norveške kompanije Eidesvik. Ugrađene gorive ćelije rade zajedno sa četiri generatora koji mogu koristiti i dizel i/ili prirodni plin. Ovim se postigao ravnomjeran rad od 7000 sati, kojim se potvrdila činjenica kako se gorive ćelije mogu prilagoditi za stabilnu i visokoučinkovitu primjenu na brodu uz nisku emisiju štetnih plinova [2].

Slijedom gore navedenog, gorive ćelije imaju svoje prednosti, a i nedostatke. Prednosti su sljedeće:

- tehnologija gorivih ćelija kao poriv broda ima potencijal u srednjoročnoj do dugoročnoj eksploataciji broda,
- metanol je moguć kao alternativno gorivo,
- gorive ćelije proizvode direktnu struju i prikladne su za brodove s električnim prijenosom snage,
- nemaju pokretne dijelove i mnogo su tiše od konvencionalnih strojeva,
- ukoliko se vodik koristi kao gorivo, ne emitiraju ugljični dioksid,
- zahtijevaju čisto gorivo i ne emitiraju štetne plinove SO_x , NO_x .

Nedostaci su sljedeći:

- iako je vodik kao gorivo najlakši za upotrebu, trebala bi se kompletna pomorska infrastruktura razviti za opskrbu takvih brodova,
- budući da proizvode direktnu izlaznu struju, nisu pogodni za brodove s mehaničkim prijenosom snage,
- gorive ćelije imaju manju specifičnu snagu i energiju u odnosu na dizelske motore.

4.1.4. Biogoriva

U svrhu nastojanja za zaustavljanje klimatskih promjena, pojavila se potreba za obnovljivim i jeftinim gorivima koji ne onečišćuju okoliš. Jedna od prvih solucija bila su biogoriva.

Biodizel i bioetanol dvije su vrste biogoriva koje se najčešće koriste. Biodizel je nastao reakcijom masti životinjskog porijekla i biljnih ulja kao što su ulje kokosa, ulje soje i sl. S druge strane, bioetanol je isključivo biljnog porijekla te nastaje fermentacijom biljaka bogatih šećerom kao što su kukuruz, šećerna trska, šećerna repa, kasava, i sl.

Iako se ne miješa s vodom, biodizel pod određenim uvjetima može reagirati s vodom i raspasti se na masne kiseline. To su jako korozivni elementi koji mogu uzrokovati veliku štetu motorima. Ukoliko se voda u spremnicima ne pomiješa s gorivom, dolazi do separacije vode i goriva te u dijelu s vodom može doći do razvoja organskih spojeva koji za posljedicu mogu imati začepljenje filtara.

S druge strane, proizvodnja bioetanola nije previše učinkovita iz razloga što se značajna količina biomase ne iskorištava. Razlog tomu je što grane i lišće koji su bogati

šećerom, s postojećom tehnologijom ne mogu dovoljno usitniti. Za razliku od biodizela, bioetanol je obično sastavljen od jednog kemijskog spoja koji je bezbojan i higroskopian. Pošto je higroskopian lako upija vodu pri čemu može doći do problema s izgaranjem i radom motora. Nadalje, voda je teža od bioetanola pa njeno taloženje na dnu spremnika stvara probleme s korozijom.

Pored gore spomenutog, najveći problem korištenja ovog goriva predstavlja obradiva površina potrebna za uzgoj kultura za njegovu proizvodnju. Postoje izvjesne procjene da je potrebna površina dvaput veća od površine Velike Britanije kako bi uzgojena količina mogla zamijeniti fosilna goriva. Nadalje, zbog prisutnosti gladi u svijetu postavlja se i etičko pitanje korištenja tako velikih obradivih površina potrebnih za proizvodnju goriva.

U fazi razvoja su i biogoriva od morskih algi. Njihov potencijal je ogroman s obzirom na činjenicu da postoje vrste koje u danu mogu doseći visinu od više metara. Sljedeća alternativa gorivima za motore s kompresijskim paljenjem dimetil ester (DME) On se može proizvesti na više načina, njegovom konverzijom iz prirodnog plina, ugljena, ostataka prerade nafte, biomase, i sl. Lagan je za rukovanje zbog manjeg tlaka kondenzacije (oko 0,5 MPa) i ne toksičnosti te ima neznatjan utjecaj na okoliš. Nadalje DME ima veći cetanski broj što dovodi do boljeg miješanja s zrakom u cilindrima motora.

S druge strane, nedostatak mu predstavlja činjenica da zbog manje gustoće i entalpije izgaranja je potrebna veća količina ubrizgavanja kako bi se postigla ista razina proizvedene toplinske energije u odnosu na standardna dizelska goriva.

Prema gore navedenog, prednosti biogoriva su sljedeće [2]:

- alternativa su neobnovljivim izvorima energije,
- postoje velike mogućnosti u razvoju sintetičkih goriva na bazi alkohola i određenih vrsta algi,
- sintetska goriva mogu se dobiti iz sintetskog plina nastalog sagorijevanjem raznih vrsta stočne hrane.

S druge strane, biogoriva imaju sljedeće nedostatke:

- prva generacija biogoriva stvorila je određene probleme kod korištenja u pomorskom okruženju,
- u današnje vrijeme, značajna površina obradivog zemljišta bi bila potrebna za proizvodnju prve generacije biogoriva u svrhu zadovoljavanja pomorskog tržišta,
- emisije štetnih plinova nastalih izgaranjem biogoriva još uvijek se ispituju,

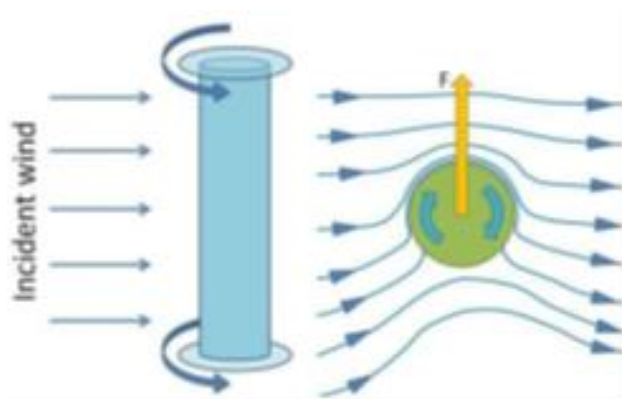
- trenutni proizvodni procesi za razlaganje šećera i biljnih ulja, nisu dovoljno učinkoviti, ali istraživanja se provode u svrhu rješavanja tog problema,
- proizvodni procesi zahtijevaju daljnja usavršavanja,
- potrebna su daljnja istraživanja na koji način skladištenje biogoriva utječe na okoliš i čovjeka [2].

4.2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Obnovljivi izvori energije pružaju znatni potencijal za budućnost, ali trenutno su vrlo ograničenih mogućnosti i skuplja je energija koja dolazi iz njih. Zbog toga će proći još neko vrijeme do značajnije upotrebe takvih izvora energije.

4.2.1. Energija vjetra

Metode koje koriste vjetar kao izvor energije za poriv brodova uključuju različite tehnologije. To su: Flettnerovi rotori, zmajevi ili spinakeri, jedra, krilata jedra te vjetroturbine. Poriv na jedra povijesno je najstariji među spomenutim tehnologijama. Jedro svoju snagu crpi iz energije vjetra i najviše se oslanja na znanje i iskustvo osobe koja upravlja brodom. Flettnerov rotor prvi put se pojavio dvadesetih godina prošlog stoljeća. Rotor koristi Magnusov učinak mehanike fluida (slika 18), gdje vjetar prolazi kroz rotacioni cilindar koji stvara silu poriva.



Slika 18. Magnusov efekt [6]

To je efekt koji je odgovoran za kružnu putanju lopte u mnogim sportovima. Ova sila ima linearnu zavisnost o vjetru za razliku od konvencionalnih jedara i krila vjetroturbina pa

brod može razviti silu poriva veću od brzine vjetra. Tipični rotor se sastoji cilindra sa učvršćenim poklopcem na vrhu i postavljen okomito na palubu broda [6].

Kod velikih brodova ti rotori mogu osigurati mali, ali značajni udio u propulzijskoj snazi. Međutim, vrtložna snaga koju proizvode isti, vrlo je složena i potpuno razumijevanje mehanizma još uvijek se razvija. Pri tome se koriste tehnike računalne dinamike fluida.

Kod broda Baden-Baden (slika 19), s dva rotora, 18 m visokih i 2,7 m promjera, rotori su postavljeni na mjesta gdje su prethodno bila tri jarbola. I takav brod je 1926. godine uspješno preplovio Atlantski ocean.



Slika 19. Brod Baden-Baden sa Flettnerovim rotorom [2]

Nedugo zatim, teretno-putnički brod „Barbara“ nosivosti 3000 BRT, plovio je uspješno linijom Hamburg-Italija kroz razdoblje od 6 godina. Problem je, međutim, ostao u tome da ukoliko nema vjetra, brod mora imati neki drugi izvor porivne snage. U posljednje vrijeme predstavljen je E-Ship 1, 10500 BRT (slika 20). Opremljen je s dva dizelska motora ukupne snage 3,5 MW i sa četiri Flettnerova rotora. Krmeni rotori nalaze se na lijevoj i desnoj strani broda, dok se pramčani nalaze iza konstrukcije mosta. S tako postavljenim rotorima, brod je sposoban ostvariti brzinu od 17,5 čvorova.



Slika 20. E-ship 1 sa četiri Flettnerova rotora[11]

Brodovi na jedra i zmajevе još su uvijek u eksperimentalnoj fazi zbog toga što u značajnoj mjeri ovise o smjeru i brzini vjеtra [6].

4.2.2. Solarna energija

Fotonaponske metode nude pristup za ograničene količine snage na brodovima na način da bi se ta snaga koristila za opskrbljivanje pomoćnih sustava. Međutim, maksimalni udio energije dobivene na ovaj način je mal u usporedbi sa snagom, koja je potrebna za poriv broda. Prosječna snaga sunčevih zraka ovisi o zemljopisnoj širini, kao i o kutu po kojem su fotonaponske ćelije smještene u odnosu na Sunce. Diljem svijeta, snaga sunčevih zraka varira i usprkos oblacima, kreće se od 87W/m^2 u Anchorageu (Aljaska), do 273W/m^2 u Nouakchott (na obali Mauritanije). Međutim, meteorološki uvjeti su vrlo je bitni u pogledu dobivanja ove energije. Danas postoje određeni konceptijski prijedlozi za povećanje raspoloživog prostora za energiju dobivenu pomoću sunca tako da solarni paneli istodobno budu i jedra. Na taj način ujedinila bi se snaga sunca i vjеtra (slika 21). Energija vjеtra i sunca kao moguća alternativna tehnologija poriva brodova ima svoje prednosti i nedostatke.



Slika 21. Kombinacija solarne energije i energije vjetra [2]

Prednosti energije vjetra i sunca predstavljaju sljedeće:

- snaga dobivena od sunca i vjetra ne emitira ispušne plinove u atmosferu,
- mogu se koristiti kao izvor za pogon pomoćnih sustava,
- pokazalo se da se solarna energija može koristiti kao pomoćni sustav snage [2].

Nadalje, nedostaci su sljedeći:

- vjetroelektrane se oslanjaju na snagu vjetra da bi bile učinkovite,
- korištenje određenih sustava temeljenih na snazi vjetra ovisi o primijenjenoj upravljačkoj tehnologiji ugrađenoj na brodu,
- iako je moguć povratak na potpuni poriv broda pomoću jedara, isto bi dovelo pojedinih komercijalnih i ekonomskih utjecaja u pogledu duljine putovanja, broju potrebnih brodova itd. ,
- učinkovitost solarne energije ovisi o globalnoj poziciji,
- solarna energija se može koristiti kao pomoćna snaga, jer fotonaponski procesi imaju malu učinkovitost i da bi se to povećalom potrebna je značajna rekonstrukcija palube za postavljanje solarnih panela.

4.2.3. Vodik

Vodik predstavlja potencijalno alternativno gorivo za poriv brodova. Zahtijeva energiju potrebnu za proizvodnju vodika, a to se može postići preko konvencionalnih goriva ili pak preko nefosilnih izvora kao što su vjetar, nuklearna energija ili

hidroelektrična energija. Trenutno sav vodik koji se koristi u industriji moguće je dobiti iz prirodnog plina.

U radu [broj-Veldhuis] procjenjuje kako bi tekući vodik za koncept studije propulzije vrlo brzog kontejnerskog broda, prijevoz kontejnera s proizvodima visoke vrijednosti i osjetljivih na meteorološke uvjete, mogao postati alternativa zračnom prijevozu. Tekući vodik koristi mnogo veću količinu specifične topline po jedinici u odnosu na konvencionalna goriva. Međutim, zahtijeva mnogo više volumena za pohranu. Ukoliko bi se skladištio na 700 bar, skladišni tankovi bili bi najmanje šest puta veći od onih potrebnih za konvencionalna goriva. Kako bi zadovoljili skladišni kapaciteti, novi dizajni brodova zahtijevali bi povećanje visine njegovog nadvodnog dijela. To bi moglo stvoriti poteškoće pri rekonstrukciju brodova [4].

Prednosti korištenja vodika se odlikuju u sljedećem:

- ne emitira štetne plinove,
- za proizvodnju koriste se izvori snage na kopnu,
- može koristiti kao gorivo u gorivim ćelijama i u motorima s unutarnjim izgaranjem,
- izgaranjem proizvode se velike zalihe vode koja se može koristiti za brodske potrebe.

S druge strane, nedostaci su sljedeći:

- na brodovima nije korišten za propulzijsku svrhu,
- sigurnosni zahtjevi koji zahtijevaju donošenje novih rezolucija,
- ima malu gustoću snage,
- zahtijeva izgradnju dobavne infrastrukture.

4.2.4. Amonijak

Bezvodni amonijak veoma je opasan, otrovan plin, ali može se kompaktno prevoziti kao tekućina u tankovima pod tlakom od 30 bar ili kao kriogena tekućina u tankovima bez tlaka. Može se koristiti za izgaranje u dizelskim motorima i plinskim turbinama. Iako ne emitira ugljični dioksid pri izgaranju, ne može se reći da je bez njegove emisije jer se pri njegovoj proizvodnji dolazi do oslobađanja istog. Njegova ogrjevna vrijednost upola je manja od dizelskog goriva pa se kod njegovog skladištenja zahtijevaju određene preinake, ali ne u mjeri kao što je slučaj s vodikom. Hladnoća amonijaka može se koristiti za hlađenja zraka (do 5°C)potrebnog za rad propulzijskog stroja. Korozivna osjetljivost

legura bakra s amonijakom dobro je poznata, ali osjetljivost čelika do točke pucanja s amonijakom može se kontrolirati s malim udjelom vode (0,2%) [2].

Prednosti su sljedeće:

- nema emisije štetnih plinova,
- dostupnost jer godišnja proizvodnja iznosi 130 milijuna tona, a što je i više nego dovoljno da zadovolji potrebe.

Nedostaci su sljedeći:

- zahtijeva primjenu novih sigurnosnih postupaka za opasne plinove,
- u svrhu iskorištavanja potrebna je izgraditi novu infrastrukturu,
- potrebno je koristiti aditive za učinkovito izgaranje,
- proizvodi se iz prirodnog plina je time i skuplji od istog,
- potrebno je iznaći rješenja za smanjenje njegovog korozivnog učinka.

4.2.5. Komprimirani zrak i tekući dušik

Komprimirani zrak i tekući dušik sljedeća su dva alternativna izvora goriva za poriv brodova. Oba goriva zahtijevaju energiju za proizvodnju te skladišne prostore za pohranu njihove dobivene energije. Zbog male gustoće snage učinkovitost njihovog pohranjivanja ovisi o masi potrebne energije između dva punjenja. Za uspješno iskorištavanje energije komprimiranog zraka potrebni su tlačni spremnici, a u slučaju tekućeg dušika kiriogeni sustavi slični istim na kopnenim postrojenjima. Kod komprimiranog zraka opasnost njegovog korištenja predstavlja mogućnost eksplozije ukoliko dođe do puknuća spremnika uslijed njegove korozije ili sudara. Međutim, u željezničkom i cestovnom prijevozu danas postoje veoma učinkovite preventivne metode koji u tom slučaju sprječavaju opasnost od istog. Na kopnu se pohranjena energija komprimiranog zraka koristi samo u kombinaciji s dizelskim i plinskim turbinama. Dobava komprimiranog zraka znači istim nije potreban sustav prednabijanja što omogućuje razvoj dodatne porivne snage veće i do 15 %.

Prednosti su sljedeće:

- komprimirani zrak i dušik ne emitiraju štetne plinove u atmosferu,
- korištenje nefosilnih goriva za njihovu proizvodnju na kopnu,
- tehnologija za skladištenje vrlo je dobro poznata.

Nedostaci su sljedeći:

- potreban razvoj opskrbe infrastrukture i distribucijske mreže,
- rizik od eksplozije zahtijeva primjenu sigurnosnih mjera,
- korozija u morskom okruženju može predstavljati velik problem,
- još uvijek nisu istraženi u svrhu poriva brodova,
- pogodnost primjene za kraća putovanja [2].

5. ZAKLJUČAK

Većina današnjih brodova kao primarne pokretače propulzora, najčešće brodskog vijka, koristi dizelske motore. Razlog je njihova toplinska učinkovitost, konceptualna jednostavnost i veća pouzdanost. Međutim, negativni utjecaj na okoliš s posljedično sve strožom legislativom za njegovu zaštitu te rastuće cijene goriva i uvođenje poreza na emisije štetnih plinova čine upitnim korištenje postojećih tehnologija te stvaraju potrebu za traženjem novih, optimalnijih rješenja poriva broda. Sve to navedeno je dovelo do potrebe razmatranja alternativnih rješenja, odnosno alternativnih vrsta pogonskih goriva koji neće imati iste nedostatke kao dizel te koji bi kao takvi eventualno mogli postati njegov kvalitetniji i poželjniji supstitut. Takav supstitut trebao bi biti obnovljiv, jeftin te ne bi trebao imati negativan utjecaj na okoliš.

U tome kontekstu kao alternativa dizelu došla su u obzir i razmatraju se biogoriva, nuklearni pogon, baterije, gorive ćelije te obnovljivi izvori energije kao što su energija vjetra, solarna energija, vodik, amonijak, komprimirani zrak i tekući dušik te hibridni poriv. Svaka od spomenutih alternativa ima svoje specifične prednosti i nedostatke. Ono što je zajedničko svim spomenutim alternativama jesu nikakve ili barem minimalne emisije štetnih plinova. Budući da svaka od alternativa ima svoje specifične nedostatke, primjenu svake od njih trebale bi diktirati specifične okolnosti, slučajevi, i sl. U svakom slučaju, u budućnosti je potrebno poduzeti daljnja detaljnija istraživanja svojstava pojedinih alternativa u svrhu otkrivanja alternative ili pak kombinacije alternativa koje su najprikladnije u određenoj situaciji, a koje imaju najbolje performanse, najmanje štetan učinak na okoliš, kao i najveću financijsku isplativost u usporedbi s ostalim postojećim alternativama.

LITERATURA

Knjige, stručni članci, publikacije:

- [1] Dobrota Đ., Lalić B., Račić N. : *Brodski energetske sustavi, materijali predavanja i auditorne vježbe*, Split 2016.
- [2] Royal Academy of Engineering: *Future ship powering options; Exploring alternative methods of ship propulsion*, 2013.
- [3] Wartsila Switzerland Ltd: *Waste Heat Recovery*, 2007.
- [4] Ivo Veldhuis: *Application of Hydrogen Marine Systems in High-speed Sea Container Transport*, University of Southampton, School of Engineering Sciences, Doctoral Thesis, 2007.
- [5] Julio A. Vergara, Chris B. McKesson. : *Nuclear Propulsion in High-Performance Cargo Vessels*, [Marine technology](#) ,39(1): 1-11, Siječanj 2002.

Internet izvori:

- [6]<http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045823/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20%28RI%20NA%202014%29.pdf>
- [7] <http://www.historyinanhour.com/2012/10/08/a-brief-history-of-maritime-shipping/>
- [8] <https://www.marineinsight.com/main-engine/different-types-of-marine-propulsion-systems-used-in-the-shipping-world/>
- [9] https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613-tablica_1
- [10] <http://www.ship-technology.com/features/featuredebating-a-carbon-tax-in-global-shipping-4885856/>
- [11] <http://www.oldsaltblog.com/2010/08/e-ship-1-has-the-flettner-rotor-ship-finally-arrived/>

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovne komponente brodskog porivnog sustava	3
Slika 2. Stupanj iskoristivosti konvencionalnih porivnih postrojenja	6
Slika 3. Sporookretni dvotaktni dizelski motor s prednabijanjem	7
Slika 4. Srednjookretni četverotaktni dizel motor	8
Slika 5. Shematski prikaz parnoturbinskog sustava	10
Slika 6. Plinska turbina s otvorenim procesom	11
Slika 7. Brod za prijevoz kemikalija mv Bit Viking	12
Slika 8. Suvremeni dizel-električni porivni sustav	13
Slika 9. Učinkovitost kod četiri faze električnog prijenosa energije	14
Slika 10. Kretanje obujma pomorske trgovine od 1962. do 2010. godine	16
Slika 11. Rezultati službenih mjerenja globalne temperature u zadnjih dvadeset godina... 17	
Slika 12. Kretanje cijene plavog dizela na različitim tržištima	19
Slika 13. Tipovi dizajna manjih reaktora.....	22
Slika 14. Nacrt nuklearno-plinskog postrojenja za "FastShip" koncept.....	23
Slika 15. Nuklearno-plinski hibridni sustav	23
Slika 16. Svjetski trend u kapacitetu punjive baterije	25
Slika 17. Teorijski toplinski motor i učinkovitost gorivih ćelija.....	27
Slika 18. Magnusov efekt	30
Slika 19. Brod Baden-Baden sa Flettnerovim rotorom	31
Slika 20. E-ship 1 sa četiri Flettnerova rotora	32
Slika 21. Kombinacija solarne energije i energije vjetra.....	33

POPIS KRATICA

IFEP - <i>Integrated Full Electric Propulsion</i>	Integrirani elektroenergetski sustav
ECCP - <i>European Cluster Collaboration Platform</i>	Europski program za klimatske promjene
MARPOL - <i>The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>	Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova
IMO - <i>International Maritime Organization</i>	Međunarodna pomorska organizacija
IAEA - <i>The International Atomic Energy Agency</i>	Međunarodna agencija za atomsku energiju
MMF - <i>International Monetary Fund</i>	Međunarodni monetarni fond
MIT (engl. <i>Massachusetts Institute of Technology</i>)	Tehnološki institut Massachusetts